

KSTAR 진공용기 및 플라즈마 대향 부품에 대한 베이킹 해석

이강희 · 임기학 · 허남일 · 인상렬* · 조승연

기초과학지원연구소, *한국원자력연구소
(1999년 6월 26일 접수)

Baking analysis of the KSTAR vacuum vessel and plasma facing components

K. H. Lee, K. H. Im, N. I. Her, S. R. In,* and S. Y. Cho

Korea Basic Science Institute, *Korea Atomic Energy Research Institute
(Received June 26, 1999)

요 약 - KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막 핵융합 실험장치의 진공용기는 불순물이 적은 깨끗한 플라즈마 발생을 위해 기저압력이 초고진공($10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa)이어야 하며 이의 실현을 위해 진공용기 내부의 불순물을 제거할 목적으로 진공용기는 250°C, 각종 플라즈마 대향 부품들은 350°C까지 베이킹 될 필요성이 있다. 본 논문에서는 계획된 베이킹 시나리오에 준하여 필요 입력열을 산출해보고 이를 근거로 적절한 베이킹 계획을 정한 후 KSTAR 질소가스 유동 베이킹 시스템에 필요한 가스의 시간에 따른 온도와 유량을 산출하였다.

Abstract - The base pressure of the vacuum vessel of KSTAR tokamak is to be a ultra high vacuum, $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa, to produce a clean plasma with low impurity concentrations. For this purpose, vessel and plasma facing components need to be baked up to 250°C, 350°C respectively to remove impurities from the plasma-material interaction surfaces. Here the required heating power to be supplied for baking has been calculated according to pre-assumed different temperature profiles (baking scenario) and proper baking plan for KSTAR tokamak has been proposed. Mass flow rate and temperature of nitrogen gas for baking has also been calculated.

1. 서 론

핵융합 실험장치에서 플라즈마는 토로이달 방전 단독으로 또는 전자공명(electron cyclotron resonance, ECR) 예비전리의 도움을 받아 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ Pa 영역에서 발생한다. 동작압력은 비록 낮은 고진공에 해당하지만 여러 가지 이유로 핵융합 실험장치의 기저진공도는 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa의 초고진공이 되지 않으면 안 된다. 진공용기의 잔류 기체는 일반적으로 H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 등으로 구성된다. 고진공 영역에서는 물이, 초고진공 영역에서는 수소가 주를 이루는 것이 보통이다. 특별히 토카막 운전 중의 소위 뜨거운 진공상태(hot vacuum)에서는 플라즈마 입자 또는 방사파가 주변의 벽에 부딪히고 유도탈리(stimulated desorption)현상에 의해 많은 기체가 방출되

는데 그중에는 CO , CO_2 등이 정상치보다 많이 차지하고 있어서 불순물농도가 급격히 높아진다.

이들 불순물의 C 및 O, 또 스퍼터링(sputtering)에 의해 용기벽에서 떨어져 나온 Fe 분자 등은 플라즈마 내에서 전리되어 플라즈마 발생을 위해 수소 이온에 공급되어야 할 에너지를 가로채고 여러 가지 형태로 전자파를 방사하여 에너지 손실을 일으킨다. 불순물은 결국 플라즈마 발생, 플라즈마의 안정성, 입자 및 에너지 밀폐 등에 악영향을 미치므로 플라즈마 발생을 위한 초고진공의 실현을 위해 가능한 억제해야만 한다. 만약 핵융합 실험장치가 초고진공에서 관리되지 않으면 깨끗한 플라즈마를 얻을 수 없고 플라즈마를 고온으로 가열하거나 더 나아가 핵융합상태에 도달할 수 없다 [1].

KSTAR 토카막 핵융합 실험 장치의 경우 진공용기 및

진공용기 내부의 플라즈마 대향 부품들은 초고진공의 달성을 위한 진공용기 내부의 잔류 불순물 제거를 목적으로 SS316LN인 진공용기는 250°C, 탄소 기반 물질인 플라즈마 대향 부품은 350°C 정도까지 베이킹할 필요성이 있다. 이 가열방법으로 고온 질소가스를 진공용기 이 중벽 사이로 흘려주는 방식과 코일에 저주파 교류전류를 흘려 진공용기를 유도가열하는 방식이 고려되고 있는데, 유도가열방식은 최대 유도 전력이 70 kW 정도로 실제 베이킹에 필요한 열량을 공급하는데 있어 적잖이 부족하며 [2], 또 국부적인 가열 특성으로 인하여 KSTAR의 베이킹 방식은 전자의 가열방식을 우선적으로 채택하고 있다.

본 논문에서는 KSTAR 진공용기와 플라즈마 대향 부품에 대한 안정적인 베이킹 계획을 결정하기 위해 베이킹시 일정한 온도 상승률을 갖는 이종(異種)의 베이킹 온도 상승 계획을 미리 가정하고 이를 근거로 0차원 해석을 수행하여 장치의 내부 에너지 증가에 필요한 열량과 복사 손실열량 계산을 통해 필요 입열물을 산출·비교해 봄으로써 베이킹 계획을 제안하였다. 또한 결정된 베이킹 계획의 실현을 위해 KSTAR 베이킹을 위한 가스유동 베이킹 시스템에서 투입해야 할 고온 질소가스의 유량과 목표 온도 도달 시간까지 매 순간의 가스 온도를 산출하였다.

토러스 형상의 핵융합 실험장치의 진공용기와 플라즈마 대향 부품 및 다층단열재에 대한 해석 모델은 길이가 유한한 동심 실린더 모델로 가정하였고, 이에 대한 기하학적 성질 및 열역학적 성질은 유효계수를 고려하여 산출하였다. 진공용기 이중 벽 내부로 흐르는 질소 가스의 유량과 온도의 계산은 진공용기 내벽과 외벽을 각각 독립적인 열전달 요소로 가정하여 구성한 모델을 이용하였다. 전체 해석에서 각 열전달 요소의 비열 값은 온도에 따라 변화하는 비열의 특성을 반영하였으며, 진공용기와 플라즈마 대향 부품의 방사율(emissivity)은 앞서 가정했던 각 온도 상승 곡선에 대해서 각각 0.1, 0.2, 0.3의 경우를 가정하여 계산하였다.

2. 베이킹 온도 상승 곡선

정해진 시간 안에 장치에 무리가 가지 않는 온도 상승률로 장치 각 부분이 해당온도로 균일하게 가열되기 위해서는 사전에 각 장치들에 대한 안정적이고 효과적인

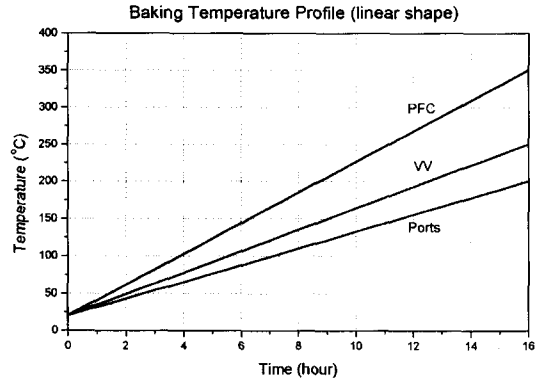


그림 1. Linear temperature profile of PFC, VV, and ports for baking (20°C/hour case).

베이킹 계획의 모색이 필요하다.

플라즈마 대향부품 지지부에 인가되는 열응력을 허용치 이하로 유지하기 위해 진공용기와 플라즈마 대향부품과의 온도차이가 크지 않으면서(100°C 이내로) 베이킹 목표온도까지 일정한 온도 상승률(14°C/hour, 20°C/hour, 40°C/hour)로 증가하는 온도 상승모델(그림 1)과 플라즈마 대향 부품, 진공용기 및 포트부(ports)의 온도를 앞의 세 온도상승률로 일정하게 상승시키다가 진공용기와 포트부가 베이킹 목표 온도에 도달하면 이들의 온도를 일정하게 유지하는 온도상승 모델(이하 F-자 온도상승곡선, 그림 2)을 가정하였다. 그림의 PFC, VV 및 ports는 각각 플라즈마 대향부품, 진공용기, 포트를 나타낸다.

현실적으로 일정한 온도 상승률을 갖는 온도 상승모델이 안정적인 것이라 예상되었으며 앞서 언급했던 세 가지 온도 상승률에 대한 베이킹 목표온도 도달 시간은

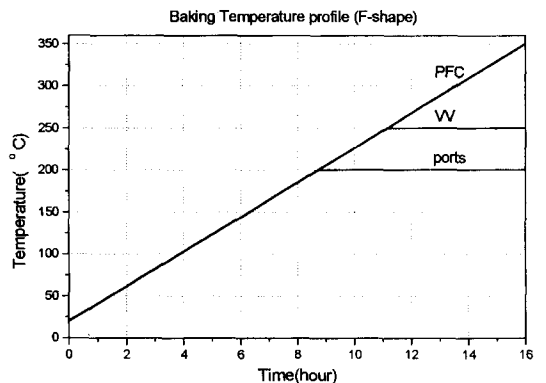


그림 2. F-shape temperature profile of PFC, VV, and ports for baking (20°C/hour case).

최대 베이킹 온도를 갖는 플라즈마 대향 부품을 기준으로 했을 때 각각 8시간, 16시간, 24시간이 된다.

3. 필요 입열량 계산

앞서 가정했던 베이킹 온도상승 모델에 근거하여, 토카막의 베이킹에 요구되는 필요 입열률은 장치의 내부 에너지 증가에 필요한 열량과 장치들 사이의 복사 열전달량을 계산함으로써 얻을 수 있다. 즉, 베이킹 시 임의의 한 순간에 장치에 공급해야할 총 필요 입열률은 다음 순간으로의 온도 상승에 필요한 열량인 내부에너지 증가를 위한 것과 정상상태 유지(혹은 온도 유지)를 위한 열량의 합이다.

복사 손실열량의 계산에 있어 진공용기의 포트를 고려하기 위해 다음의 두가지 열전달 경로를 설정하였다.

- 1) 경로 1 : 플라즈마 대향부품 → 진공용기 → 다층단열재 → 저온유지판(80K).
- 2) 경로 2 : 포트부 → 다층단열재 → 저온유지판(80K).

KSTAR 토카막 핵융합 실험장치는 토러스 형상으로 장치 각 부분은 토로이달(toroidal)방향으로 대칭성을 갖기 때문에 이들의 베이킹 해석에 연관되는 해석모델은 길이가 유한한 동심 실린더로 가정하였고, 이에 대한 기하학적 성질 및 열역학적 성질은 유효계수를 고려하여 산출하였다.

3.1. 내부에너지 증가를 위한 필요 열량(Q_{in})

베이킹 시 매 시간간격 Δt 동안 각 장치의 온도 T₁에서 T₂로의 내부에너지 증가를 위해 요구되는 입열율 Q_{in}(i)은 다음과 같다.

$$Q_{in}(i) = \frac{m_i C_{p(i)}(T_2 - T_1)}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서, i는 진공용기, 플라즈마 대향부품, 포트이고, C_{p(i)}는 각 장치들의 유효 비열값이며 온도변화에 따른 비열의 차이가 고려된 값이다. m_i는 진공용기, 플라즈마 대향 부품, 포트의 질량으로 각각 25000 kg, 21000 kg, 13000 kg이다.

앞서 가정했던 각 장치들에 대한 베이킹 온도 상승곡선으로부터 내부에너지 증가에 필요한 열량은 쉽게 계산되며 온도가 직선적으로 증가하는 모델에서 온도 상승률이 20°C/hour인 경우 플라즈마 대향부품과 용기의 내부에너지 증가를 위한 필요열량은 평균적으로 각각

70 kW, 62 kW정도가 소요된다.

3.2. 복사 손실 열량 (Q_{rad})

플라즈마 대향부품에서 진공용기로 전달되는 복사 손실열량 및 진공용기와 포트에서 다층단열재로 전달되는 복사 손실열량은 각각 다음(식 2)과 같이 계산될 수 있다.

$$Q_{rad,loss(PFC \rightarrow VV)} = \frac{\sigma S_{PFC}(T_{PFC}^4 - T_{VV}^4)}{1/\epsilon_{PFC} + (r_{VV}/S)(1/\epsilon_{VV} - 1)} \quad (2a)$$

$$Q_{rad,loss(VV(ports) \rightarrow MLI)} = \frac{M \times \sigma S_{VV(ports)}(T_{VV(ports)}^4 - T_{MLI}^4)}{2/\epsilon_{VV(ports)} + N \times (2/\epsilon_{MLI} - 1)} \quad (2b)$$

여기서, S는 표면적, r_{PFC}과 r_{VV}는 각각 플라즈마 대향부품과 진공용기의 유효반경, N은 다층단열재의 층수를 나타내며, 진공용기와 포트로부터 다층단열재로 전달되는 복사열량은 이론적인 열전달 해석결과에다 일본의 초전도 핵융합 실험 장치인 LHD장치 [3]로부터 유추된 보정계수 M(=5)를 곱하여 계산하였다.

복사 손실열량에 관여하는 장치 표면의 표면정도가 충분히 우수하다면 이들에 대한 방사율을 0.3이하로 가정할 수 있다 [4]. 본 논문에서는 장치들의 방사율을 0.1, 0.2, 0.3로 정의하고 이들 각 경우에 대하여 각 장치들의 복사 손실열량을 계산하였다.

3.3. 베이킹을 위해 공급되어야 할 필요 입열율(Q_{req})

고온 질소가스의 유동을 이용해서 베이킹을 위해 각 장치들에 공급해야할 필요 입열율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{req}(PFC) = Q_{in}(PFC) + Q_{rad}(PFC \rightarrow VV) \quad (3a)$$

$$Q_{req}(VV) = Q_{in}(VV) + Q_{rad}(VV \rightarrow MLI) - Q_{rad}(PFC \rightarrow VV) \quad (3b)$$

$$Q_{req}(ports) = Q_{in}(ports) + Q_{rad}(ports \rightarrow MLI) \quad (3c)$$

여기서 Q_{req}, Q_{in}, Q_{rad}는 각각 필요입열률, 내부에너지 증가를 위한 열량, 복사손실열량을 의미한다.

4. 결과 고찰 및 베이킹 계획 제안

직선적으로 증가하는 온도 상승 모델과 F자 온도 상승모델에 근거한 필요 입열률을 세가지 온도 상승률에 따라 각각 계산하여 그림 3에서 그림 8까지 나타내었다. 같은 온도 상승모델을 근거로 세가지 온도상승률에 따라 계산된 각각의 필요입열률 곡선의 대략적인 경향은

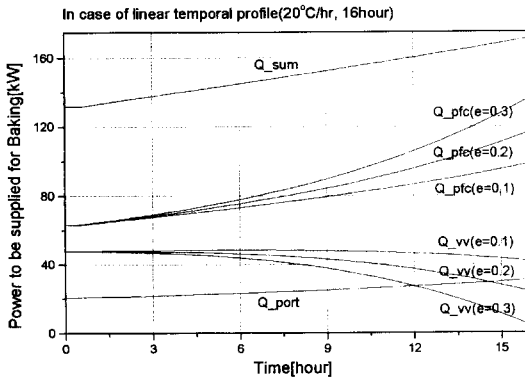


그림 3. Required heating power of PFC, VV, and ports to be supplied for bakeout (linear, 20°C/hr).

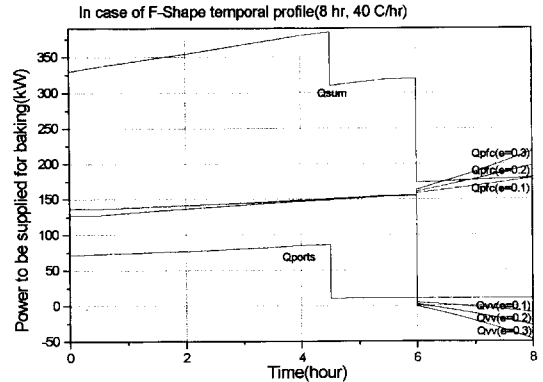


그림 6. Required heating power of PFC, VV, and ports to be supplied for bakeout (F, 40°C/hr).

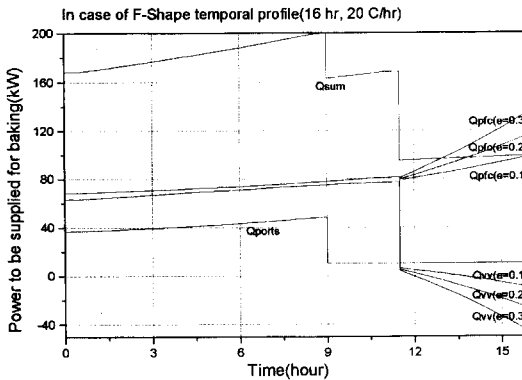


그림 4. Required heating power of PFC, VV, and ports to be supplied for bakeout (F, 20°C/hr).

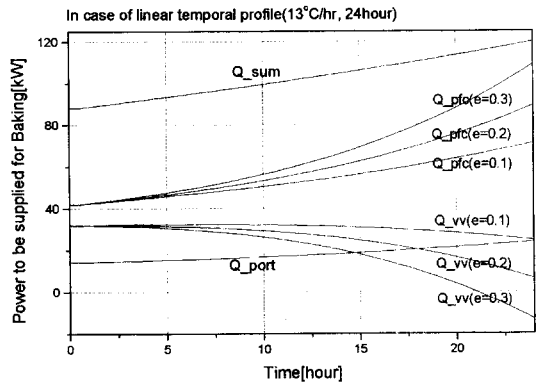


그림 7. Required heating power of PFC, VV, and ports to be supplied for bakeout (linear, 13°C/hr).

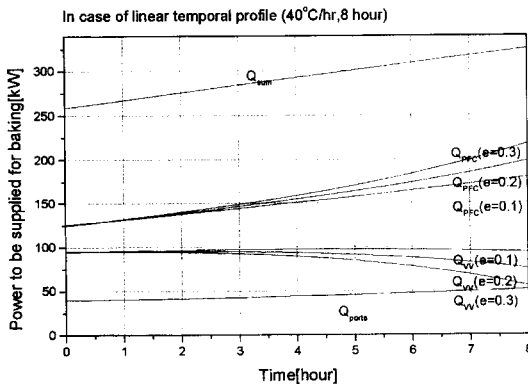


그림 5. Required heating power of PFC, VV, and ports to be supplied for bakeout (linear, 40°C/hr).

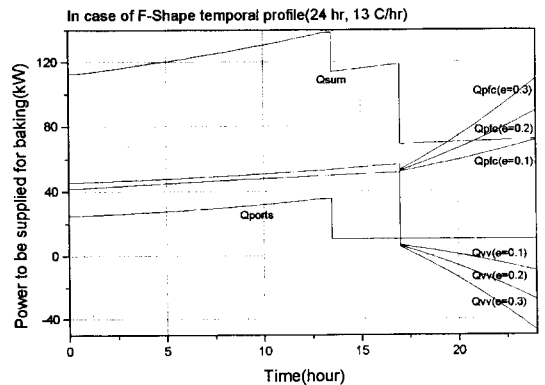


그림 8. Required heating power of PFC, VV, and ports to be supplied for bakeout (F, 13°C/hr).

동일하며 다만 수치적으로 차이를 보이고 있다.

직선적인 온도 상승모델에 근거한 필요 입열률 곡선은 시간에 따라 유연하게 변화하는데 반해 F자 온도 상

승모델의 경우 상당한 굴곡이 있어 입열량을 제어하는 측면에서의 어려움이 예상되며 전자의 경우에 비해 비효율적이라 판단된다.

직선적으로 증가하는 온도 상승모델에서 온도 상승률에 따른 필요 입열률의 총량을 비교해 볼 때 20°C/hour의 온도 상승률로 16시간 동안 가열하여 베이킹 목표온도에 도달하는 경우가 최대 170 kW정도의 입열률을 필요로 하는데 총 필요 입열률이 최대 320 kW인 40°C/hour 온도 상승률에 비해 적정하다고 판단되며 온도 상승률 20°C/hour는 일반적으로 거대 구조물의 베이킹에 큰 무리를 주지 않는 온도 상승률로 알려져 있다.

이러한 결과로부터 베이킹 계획으로서 장치 각 부분의 베이킹 목표온도까지 최대 20°C/hour의 온도 상승률로 일정하게 증가시키는 온도 상승모델이 적정하다고 판단되며 예상 베이킹 목표 온도 도달시간은 16시간 정도가 된다. 이 베이킹 온도상승 모델을 만족시키기 위해 장치 전체에 공급해야할 총 입열률은 최대 170 kW정도가 소요되리라 예상된다.

5. 가열 가스의 유량 · 온도 계산

이상의 베이킹 계획에 대한 온도 상승 곡선을 만족시키기 위해 0차원 모델에 준하여 계산된 필요 입열율을 가열가스를 통해서 공급한다는 측면에서 볼 때 실제 베이킹 시 예상되는 시간에 따른 질소가스의 온도와 유량을 미리 산출해 보고자 한다. 추가적으로 베이킹 시 질소가스의 유로는 진공용기 이중 벽 사이가 되기 때문에 이에 대한 열전달 해석 모델로써 진공용기의 내벽과 외벽을 각각 독립적인 열전달요소(길이가 유한한 동심 실린더)로 가정하여 해석을 수행하였다.

베이킹을 위해 공급되어야 할 가열가스의 시간에 따른 유량은 이전의 필요입열율에 대한 해석결과를 근거로 다음 식을 이용하여 산출이 가능하다.

$$\dot{m}_{gas} = \frac{Q_{reqVV}}{C_p(N_{gas})\Delta T} \quad (4)$$

여기서 ΔT 는 입구와 출구의 가스 온도차를 나타내며 30°C로 일정하다고 가정하였다. 그림은 플라즈마 대향 부품의 방사율에 따라 계산된 가열가스의 유량을 나타내고 있다.

질소가스의 시간에 따른 온도곡선은 진공용기 내벽과 외벽에 대한 에너지 보존 방정식을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$m_{VV_e} C_p \frac{\Delta T_{VV_e}}{\Delta t} = hA (T_{gas} - T_{VV_e})$$

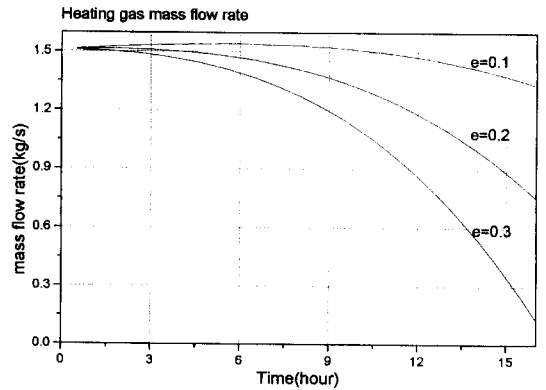


그림 9. Mass flow rate of hot nitrogen gas.

$$+ C_1(T_{PFC}^4 - T_{VV_e}^4) - C_2(T_{VV_e}^4 - T_{VV_w}^4) \quad (5a)$$

$$m_{VV_w} C_p \frac{\Delta T_{VV_w}}{\Delta t} = hA (T_{gas} - T_{VV_w}) + C_2(T_{VV_e}^4 - T_{VV_w}^4) - 5 \times C_3(T_{VV_w}^4 - 80^4) \quad (5b)$$

여기서 C_i 는 각 요소들 사이의 복사 열전달에 연관되는 상수로서 식 (2a)에 나타난 것과 같은 형태로 표시되며, 미지수는 붉은 글자로 나타내었다. 질소가스와 진공용기 이중 벽과의 대류 열전달 계수 h 는 KSTAR 진공용기의 폴로이달 방향 유동경로(poloidal flow channel)의 경우 유로 단면적이 일정하지 않아, 일정한 유량에 대해서 위치별 유속과 수력반경이 일정하지 않으므로 각 폴로이달(poloidal) 위치에 따라 레이놀드 계수(Re, Reynolds number)가 달라지고, 그에 따라 h 의 값도 큰 차이를 보이므로 hA 대신 $fh \cdot dA$ 값을 사용하였다.

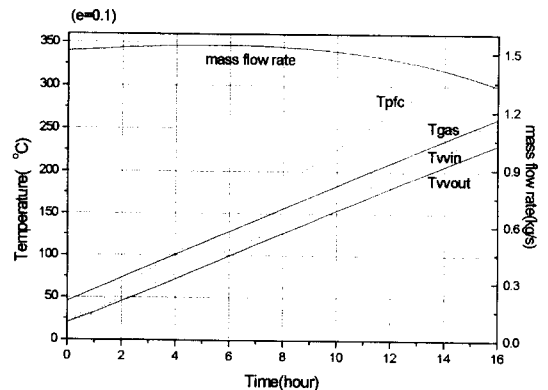


그림 10. N₂ gas and VV outer wall temperature, nitrogen gas mass flow rate (e=0.1).

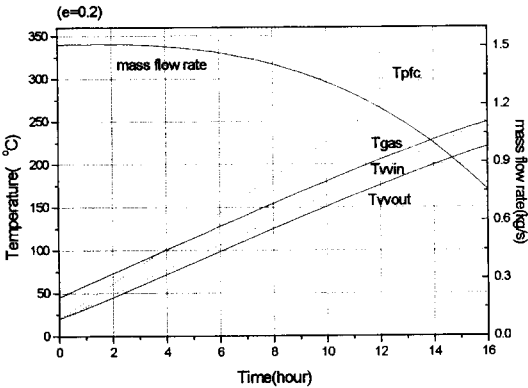


그림 11. N₂ gas and VV outer wall temperature, nitrogen gas mass flow rate (e=0.2).

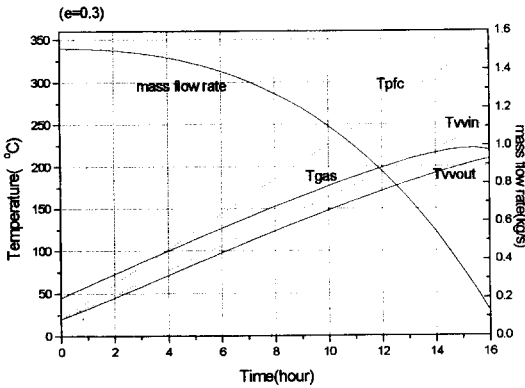


그림 12. N₂ gas and VV outer wall temperature, nitrogen gas mass flow rate (e=0.3).

그림 10, 11, 12는 플라즈마 대향 부품의 방사율에 따라 각각 계산된 가열가스의 온도와 유량의 변화를 나타낸다. 단, VV는 진공용기를, PFC는 플라즈마 대향 부품을 의미한다.

6. 결 론

토카막 핵융합 실험장치의 베이킹을 위해 장치 각 부

분에 공급해야할 필요 입열량을 장치 자체의 내부에너지 증가를 위한 열량과 복사 열전달량의 합으로서 계산하였다. 이종(異種)의 온도 상승 모델을 근거로 계산된 필요 입열률 곡선만으로 베이킹 계획을 결정하는데 무리가 있지만 질소 가스 유동 시스템을 주 베이킹 방식으로 이용하는 KSTAR 토카막 핵융합 실험장치의 경우 시간에 따라 입열률을 제어해야하는 측면에서 효과적인 온도상승 모델인 직선적으로 베이킹 목표온도까지 일정하게 증가하는 모델을 베이킹 온도상승 모델로서 제안하고자 한다. 온도 상승률은 일반적으로 큰 구조물의 균일한 가열에 무리가 없는 20°C/hr정도가 적절할 것으로 판단되며 이에 따를 경우 베이킹 목표 온도까지 도달하는데 16시간이 소요된다.

베이킹을 위해 진공용기 이중벽 사이로 공급해야 할 가열가스의 시간에 따른 온도는 진공용기 내벽과 플라즈마 대향 부품의 베이킹 온도 상승 곡선을 만족시키면서 진공용기보다 10~20°C정도 큰 값으로 계산되어 큰 온도차를 나타내지 않음을 알 수 있었다. 또 가열가스의 유량은 플라즈마 대향 부품의 방사율에 따라 차이를 보이지만 진공용기의 필요 입열률에 직접적으로 비례하여 시간에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보였다.

현재의 베이킹 해석에 있어서는 0차원 모델을 이용하였으나 보다 실질적인 경향과 수치를 얻기 위해서 향후 고차원 모델의 해석을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 인상렬, 윤병주, 조승연, 'KSTAR 진공용기의 베이킹시 열용력 해석', 한국진공학회지, 7(4), 285 (1998).
- [2] 임기학, 김진춘, 한국 물리학회 회보, 16(2), 419 (1998).
- [3] 三戸 利行, 佐藤 定男, 前川 龍司, '低温工学', 32(11), 608 (1997).
- [4] J. P. Holman, 'Heat Transfer', 5th ed., McGraw-Hill, Singapore, 1981.